

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Н.А. Спирин, Ю.Г. Ярошенко, В.С. Швыдкий, В.В. Лавров,
В.Ф. Ярчук, В.Ю. Носков

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

Сформулирована задача нестационарного теплообмена в зоне расплава доменной печи, учитывающая особенности процесса фильтрации чугуна и шлака через коксовую насадку. Общая закономерность заключается в аperiodическом (неколебательном) характере переходных процессов теплообмена в слое. Однако это положение справедливо только при условии постоянства отношения теплоемкостей потоков материалов и газа по высоте рассматриваемого участка слоя, что в полной мере не отражает характера развития теплообменных процессов по высоте доменной печи. Показано, что аperiodический (неколебательный) переходный процесс в доменной печи наблюдается в том случае, если возмущение оказывает одинаковое по знаку воздействие на нижнюю и верхнюю ступени теплообмена, а колебательный – если оно оказывает противоположное влияние на эти зоны теплообмена. Величина перерегулирования при этом будет тем больше, чем существеннее по величине и по знаку это различие.

Ключевые слова: доменный процесс, теплообмен, зона расплава, математическое моделирование, переходные процессы.

The problem of non-stationary heat exchange in smelting zone of the blast furnace, considering features of process of a filtration of pig-iron and slag through coke nozzle is formulated. Blanket law consists in not oscillatory character of transients of heat exchange in a course. However this position is fair only under condition of a constancy of the relation of thermal capacities of streams of materials and gas on height of a considered site of a course, that to the full does not reflect character of development processes exchange of heat on blast furnace height. It is shown, that not oscillatory transient in a blast furnace is observed in the event that indignation influences identical on a sign the bottom and top steps of heat interchange, and oscillatory – if it makes opposite impact on these zones of heat interchange. The reregulation size thus will be that more than more essentially on size and on a sign this distinction.

Keywords: blast-furnace process, heat exchange, smelting zone, mathematical modelling, transients.

Технология выплавки чугуна в доменных печах – наиболее сложная. Эффективность ее во многом определяется знаниями закономерностей развития тепловых и физико-химических явлений по высоте печи, уровень которых позволяет непрерывно совершенствовать приемы управления аэродинамическим и тепловым режимами доменной плавки. В последнее время исследователями разных стран много внимания уделялось изучению состояния температурных полей, полей скоростей, концентраций CO_2 , H_2 , CO по высоте печи [1, 2]. Благодаря результатам этих исследований удалось получить новые или уточнить существующие знания о протекании взаимосвязанных между собой тепловых, физико-химических процессах, а также

процессах движения газов и материалов. Важно отметить, что эти исследования относились к изучению стационарных состояний процесса доменной плавки, когда все ее параметры не изменялись во времени.

В реальных условиях работы доменной печи любое изменение параметров плавки – изменение рудной нагрузки, состава дутья, его температуры, влажности и пр. – является нарушением (возмущением) стационарного состояния, в результате чего возникает переходный процесс к новому стационарному состоянию. Переходные процессы в доменных печах, связанные с перестройкой температурных и концентрационных полей, полей давления и скоростей газа, носят нестационарный характер.

Наибольшее влияние на уровень устойчивости режимов работы доменной печи оказывают переходные процессы, определяющие тепловое состояние, особенно в высокотемпературной зоне (в области заплечиков и горна), зоне, где формируются продукты плавки, их качественные и количественные характеристики, определяющие технико-экономические показатели технологии производства чугуна.

В зависимости от вида и знака возмущения, например, нарушающего тепловое состояние горна, возможно либо его разогрев, либо его похолодание. Если возникли возмущения по нескольким параметрам, то протекание переходных процессов существенно усложняется. Опытные представления о характере и продолжительности переходных процессов не раскрывают всей картины перестройки полей главных параметров доменной плавки. Подобная ограниченность может быть устранена изучением переходных процессов в доменной печи методами математического моделирования [3–7].

Для исследования закономерностей перестройки температурных полей в зоне расплава необходимо было получить представления об изменении температур кокса, чугуна, шлака на различных горизонтах по высоте зоны расплава. При постановке задачи нестационарного теплообмена в нижней части доменной печи за основу была принята схема движения материалов и газов, представленная в работах [6–10]. В соответствии с принятой схемой в зоне расплава происходит нагрев газом трех составляющих шихты – кокса, чугуна и шлака, причем каждая из них, в свою очередь, пребывает в состоянии теплообмена между собой. В этой зоне развиты как конвективные процессы теплообмена, так и процессы лучистого теплообмена (тепловое излучение). Конвективный теплообмен имеет место между газом и коксом, газом и чугуном, газом и шлаком, а также между шлаком и коксом, поскольку стекающий по коксу шлак частично покрывает его поверхность, а лучистый теплообмен происходит между тремя компонентами шихты: коксом, чугуном и шлаком.

В такой постановке математически задача описывается следующей системой уравнений:

– для кокса, чугуна, шлака:

$$c_{iM}\rho_{iM}\frac{\partial t_i}{\partial \tau} + c_{iM}\rho_{iM}w_{iM}\frac{\partial t_i}{\partial y} = \frac{\alpha_{Fi}}{m'_i}f_{iM}(T - t_i) + \sum_{k=1}^{k=3} C_{\text{npik}} \left[\left(\frac{t_k + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_i + 273}{100} \right)^4 \right] + \sum_{k=1}^{k=3} \alpha_i f_i(t_k - t_i); \quad (1)$$

– для газа:

$$c_{\text{г}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г}} \frac{\partial T}{\partial y} = \sum_{i=1}^{i=k} f_{iM} \frac{\alpha_{Fi}}{m'_i} (T - t_i); \quad (2)$$

с граничными и начальными условиями:

$$y = 0, t_i = t'_i(\tau); y = y_0, T = T'(\tau); \quad (3)$$

$$\tau = 0, t_i = \Phi(y), \quad (4)$$

где y – текущая координата по высоте слоя; w – скорость, м/с; ρ – плотность, кг/м³; α_F, α_i – коэффициенты конвективного теплообмена, кВт/м²·К; c – теплоемкость, кДж/м³·К; m'_i – коэффициент массивности; $C_{\text{прик}}$ – приведенный коэффициент излучения, кВт/м²·К⁴; f – удельная поверхность, м²/м²; T, t – температуры газа и материалов, °С; индексы: $i = 1$ для кокса; $i = 2$ для чугуна; $i = 3$ для шлака; г – для газа; м – для материала.

Решение системы дифференциальных уравнений осуществлялось численным методом прямых.

Плотности орошения расплавом при выполнении расчетов определяли по производительности печи и выходу шлака. Средние скорости опускания коксовой насадки при расчете стационарного температурного поля принимали пропорциональными количеству кокса, сгорающего у фурм и расходуемого на науглероживание чугуна. В целях учета изменения кажущейся теплоемкости за счет процессов плавления, прямого восстановления и науглероживания чугуна было принято допущение, что плавление железорудных материалов происходило мгновенно. Это позволило отнести соответствующий тепловой эффект к кажущейся теплоемкости чугуна и шлака пропорционально их количеству на входе в зону плавления. Затраты тепла на прямое восстановление отнесли к кажущейся теплоемкости кокса, а тепловой эффект науглероживания железа – к кажущейся теплоемкости чугуна. По высоте слоя распределение затрат тепла принято равномерным. Кажущиеся теплоемкости материалов определяли методом последовательного приближения и коррекции отношения тепловых эффектов химических реакций к температурному интервалу нагрева каждого из потоков. Температура плавления железорудных материалов принималась равной 1250 °С, а температура газа на входе в теплообмен $T' = 1900$ °С. Коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена определялись по данным [1, 6, 10].

Адаптацию модели проводили по варианту расчета стационарного распределения температур по высоте зоны расплава (рис. 1).

Поскольку прямое сопоставление рассчитанных температур с действительными в зоне расплава произвести невозможно в силу сложности промышленного эксперимента, то достоверность полученных расчетом результатов оценивали по фактической конечной температуре чугуна и шлака на выпусках. При этом учитывали, что температура кокса, поступающего в зону горения, близка к температуре шлака, а температура чугуна ниже температуры шлака на 40–60 °С [1, 2]. Подобное соотношение температур получили и

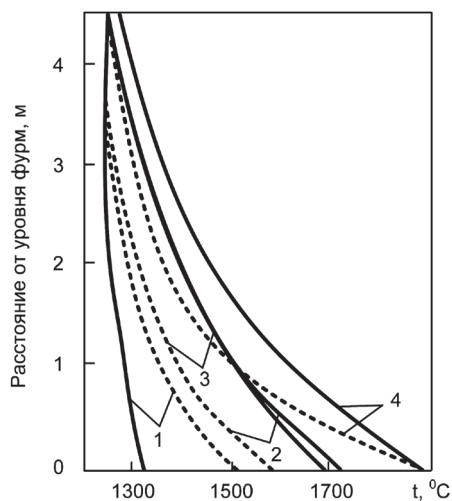


Рис. 1. Стационарные температурные поля чугуна (1), кокса (2), шлака (3) и газа (4) по высоте зоны расплава с учетом взаимного лучистого теплообмена между потоками (пунктирные линии) и без него (сплошные линии)

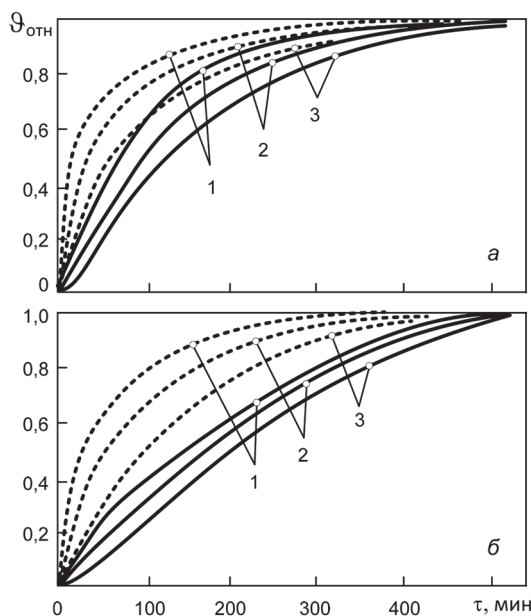
в результате расчета, что подтвердило правомерность допущений, принятых в модели. При анализе результатов моделирования было установлено, что лучистый теплообмен в нижней части доменной печи действительно существен. Так, разность температур между чугуном и коксом без учета лучистого теплообмена составляла 400 °C, а с его учетом – 80 °C.

В свою очередь, вследствие интенсивного конвективного теплообмена между шлаком и коксом их температуры оказались близкими и различие между ними составило 5–10 °C.

На следующем этапе анализа исследовали переходные процессы при ступенчатом изменении температуры газа в фурменных очагах – T' , с 1900 до 2100 °C. При таком возмущении было отмечено, что температура чугуна, шлака и кокса повысилась на 60–70 °C. Изменения температуры шлака (кокса) и чугуна в переходном процессе приводили к единичному возмущению и были представлены в относительных единицах (рис. 2).

Поэтому справедливо условие: при $\tau \rightarrow \infty$ на всех горизонтах по высоте слоя $\vartheta_{\text{отн}}$ и $\vartheta_{\text{отн}} = \frac{t_i(y) - t_i^0(y)}{t_i^\infty(y) - t_i^0(y)}$, где $t_i(y)$, $t_i^0(y)$ и $t_i^\infty(y)$ соответственно текущее, начальное и конечное (установившиеся) значение температур для i -го материала на данном горизонте слоя. Анализ результатов математического моделирования показал, что на разных горизонтах инерционность процессов неодинакова и возрастает от нижних горизонтов к верхним, что обусловлено различием тепловых потоков от газа к материалу по высоте зоны расплава. На уровне фурм, где существует максимальная разность температур газа и материалов, а, следовательно, и максимальная величина теплового потока, скорость нагрева (охлаждения) материалов максимальна. Моделирование также было выполнено в двух вариантах: с учетом лучистого теплообмена и без учета этого явления. Установлено, что лучистый теплообмен выравнивает скорости нагрева потока материалов и охлаждения потока газа. Учет лучистого теплообмена необходим при исследовании закономерностей деформации температурных полей в переходных и квазистационарных режимах. В то же время учет различий в теплофизических свойствах кокса, чугуна, шлака и взаимного лучистого теплообмена между ними не оказывает заметного влияния на общую длительность переходных процессов.

Рис. 2. Изменение температуры чугуна (сплошные линии), кокса и шлака (пунктирные линии) в переходном процессе при ступенчатом изменении температуры газа на входе в теплообмен с учетом (а) и без учета (б) теплообмена излучением на расстоянии от уровня фурм, м: 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1,0



Следует отметить, что общая закономерность, которая обобщает результаты по математическому моделированию процессов нестационарного теплообмена в слое, заключается в аperiодическом (неколебательном) характере переходных процессов. Однако это положение справедливо только при условии постоянства отношения теплоемкостей потоков материалов и газа по высоте рассматриваемого участка слоя, что в полной мере не отражает характера развития теплообменных процессов по высоте доменной печи. В связи с этим результаты моделирования процессов нестационарного теплообмена в слое, учитывающие тепловые эффекты процессов восстановления, дают лишь количественную оценку длительности переходных процессов и общие представления о характере переходных процессов в отдельных участках слоя, но не для печи в целом.

Выполнить более глубокий анализ можно только с использованием полных динамических моделей, позволяющих учитывать основные явления в доменной печи от уровня засыпи до уровня чугунных леток. Такой анализ выполнен Б.А. Боковиковым и В.И. Мойкиным с использованием математической модели доменного процесса (модель ВНИИМТ) [6] (рис. 3). В этих работах показано, что переходный процесс, оцениваемый по содержанию кремния в чугуне, имеет аperiодический (неколебательный) характер по каналу рудной нагрузки, когда при увеличении (уменьшении) последней содержание кремния в чугуне и его температура монотонно падают (возрастают) и стремятся к новому установившемуся значению.

Однако при воздействиях по расходу природного газа и технологического кислорода такого аperiодического характера переходного процесса не наблюдается. Переходный процесс для этих случаев носит знакопеременный (колебательный) характер. Если в первый момент времени после снижения содержания кислорода в дутье температура в горне также снижается, что приводит к уменьшению содержания кремния в чугуне, то после прохождения примерно одного оборота материалов происходит разогрев продуктов плавки за счет снижения скорости опускания материалов, повышения температуры в шахте и увеличения степени восстановления в верхней ступени теплообмена.

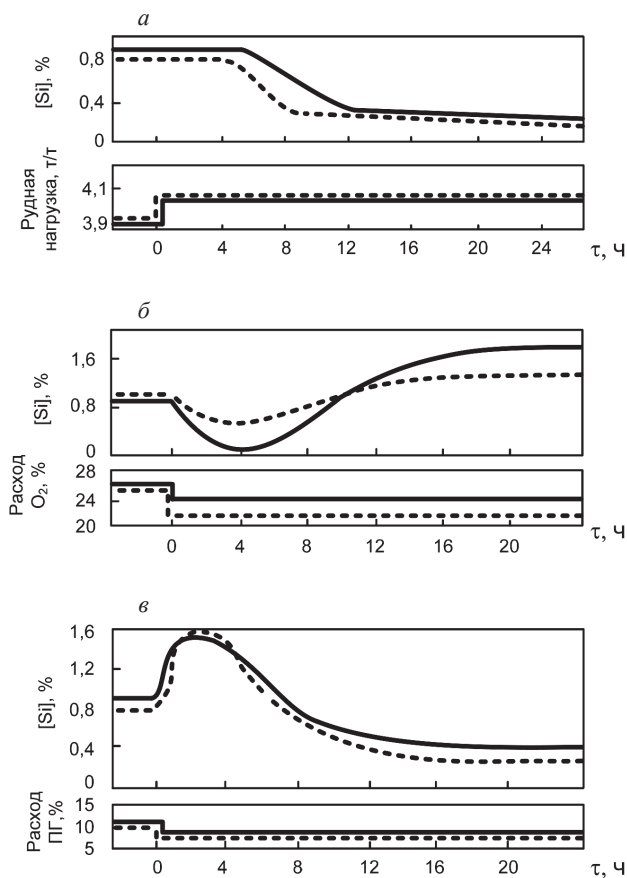


Рис. 3. Изменение содержания кремния в чугуне при ступенчатом изменении рудной нагрузки (*a*), расходе кислорода (*б*) и расходе природного газа (*в*)

Противоположная картина возникает при снижении расхода природного газа. В начальный момент времени в результате повышения температуры в горне содержание кремния в чугуне возрастает, однако по истечении времени, равного одному обороту материалов, доменная печь начинает холодеть. Это обусловлено увеличением скорости схода материалов, уменьшением степени восстановления материалов в шахте из-за снижения в этом участке печи температуры как газа, так и шихты, а также уменьшения содержания водорода в восстановительном газе.

Выводы

Лучистый теплообмен выравнивает скорости нагрева (охлаждения) потоков и учет его необходим при исследовании закономерностей деформации температурных полей в переходных и квазистационарных режимах. Колебательный переходный процесс в доменной печи наблюдается в том случае, если после нанесения возмущения оно будет оказывать противоположное влияние на тепловое состояние нижней и верхней ступеней теплообмена. Величина перерегулирования при этом будет тем больше, чем существеннее по величине и по знаку это различие.

Список использованных источников

1. Китаев Б.И. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий. М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
2. Вегман Е.Ф. Металлургия чугуна. Учебник для вузов. 3-е изд., перер. и доп. / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин и др. / Под ред. Ю.С. Юсфина. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
3. Numerical simulation on dynamic and static holdups of powder inside pre-reduction shaft furnace / Jian Xu, Sheng-li Wu, Xin-ying Guo, Kai-ping Du. Technical contribution to the 6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Pp. 414–424.
4. Modelling of liquid flow the blast furnace: Theoretical analysis of the effects of gas, liquid and packing properties / Chew Sheng Jason, Zulli Paul, Yu Aibing // ISIJ International. 2001. 41, № 10. Pp. 1112–1121.
5. Transient mathematical model of blast furnace based on multi-fluid concept, with application to high operation / De Castro Jose Adilson, Nogami Hiroshi, Yagi Jun-ichiro // ISIJ International. 2000. 40, № 7. Pp. 637–646.
6. Овчинников Ю.Н. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н. Овчинников, В.И. Мойкин, Н.А. Спирин, Б.А. Боковых. Челябинск: Металлургия, 1989. – 120 с.
7. Спирин Н.А. Нестационарный теплообмен в нижней части доменной печи / Н.А. Спирин, Б.И. Китаев, Ю.Н. Овчинников // Изв. вузов. Черная металлургия. 1982. № 6. С. 113–118.
8. Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе / Под ред. С.В. Шаврина // Труды института металлургии УФАИ СССР. Часть 1, вып. 24, 1970. 130 с. Часть 2, вып. 26, 1972. 140 с.
9. Онорин О.П. Фильтрация железистых шлаковых расплавов через коксовую насадку / О.П. Онорин, В. И. Гладышев, Л.И. Каплун // Изв. вузов. Черная металлургия. 1997. № 2. С. 11–14.
10. Мысик А.Ф. Исследование теплообмена в орошаемом слое кусковых материалов / А.С. Кукаркин, Б.И. Китаев, Н.М. Бабушкин // Изв. вузов. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 125–128.